

# Politechnika Wrocławska

## Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

---

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)

### PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

TYTUŁ PRACY:  
Zastosowanie sztuki origami w robotach  
kosmicznych napędzanych żaglem  
słonecznym

AUTOR:  
Maciej Wojtas

PROMOTOR:  
Dr inż. Robert Muszyński,  
Katedra Cybernetyki i Robotyki



*Kochanym Rodzicom*



# Spis treści

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Wstęp</b>                                  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Żagiel słoneczny</b>                       | <b>7</b>  |
| 2.1      | Ciśnienie promieniowania . . . . .            | 7         |
| 2.2      | Własności żagla . . . . .                     | 8         |
| 2.3      | Ścieżki ruchu . . . . .                       | 8         |
| 2.4      | Metody sterowania żaglem kosmicznym . . . . . | 11        |
| <b>3</b> | <b>Origami</b>                                | <b>13</b> |
| 3.1      | Siatka zgięć . . . . .                        | 13        |
| 3.2      | Zasady origami . . . . .                      | 15        |
| 3.3      | Wybrane modele . . . . .                      | 18        |
| <b>4</b> | <b>Projekt żagla</b>                          | <b>27</b> |
| 4.1      | Dobór struktury i materiału . . . . .         | 27        |
| 4.2      | Dobór mechanizmu rozkładania . . . . .        | 27        |
| <b>5</b> | <b>Zakończenie</b>                            | <b>33</b> |
|          | <b>Literatura</b>                             | <b>35</b> |
|          | <b>Spis rysunków</b>                          | <b>39</b> |

Do składu pracy wykorzystano system przygotowania dokumentów  $\LaTeX$ , opracowany przez L. Lamport [Lam94], będący nakładką systemu  $\TeX$ , [Knu86a,Knu86b]. Matematyczne czcionki o nazwie AMS Euler, których używamy w tej pracy, zostały przygotowane przez H. Zapfa [KZ86], przy współpracy z D. Knuthem i jego studentami, na zlecenie Amerykańskiego Towarzystwa Matematycznego. Wybrane czcionki składu tekstu, Antykwa Toruńska [Now97] – jeden z nielicznych krojów pisma zaprojektowany specjalnie dla języka polskiego w sposób uwzględniający jego rytm – w odczuciu autora doskonale współgrają z kształtem czcionki AMS Euler, pozwalając na uzyskanie harmonijnej całości. Składu bezszeryfowego tekstu maszynowego dokonano z użyciem opracowanej przez R. Leviena czcionki o nazwie Inconsolata [Lev15].

[Knu86a] D. E. Knuth, *The  $\TeX$ book, volume A of Computers and Typesetting*. Addison-Wesley, Reading, 1986.

[Knu86b] D. E. Knuth,  *$\TeX$ : The Program, volume B of Computers and Typesetting*. Addison-Wesley, Reading, 1986.

[KZ86] D. E. Knuth i H. Zapf, *AMS Euler – A new typeface for mathematics*. Scholarly Publishing, 20:131–157, 1986.

[Lam94] L. Lamport,  *$\LaTeX$ : A Document Preparation System*. Addison-Wesley, Reading, 1994.

[Lev15] R. Levien, *Inconsolata*. <https://levien.com/type/myfonts/inconsolata.html>, 2015.

[Now97] J. Nowacki, *Antykwa Toruńska – od początku do końca polska czcionka*. *Biuletyn Polskiej Grupy Użytkowników Systemu  $\TeX$* , 9:26–27, 1997.



# Rozdział 1

## Wstęp

Od zarania dziejów ludzkość marzyła o podróżach kosmicznych, czego wyrazem jest podejmowanie tej tematyki w fantastyce naukowej. Już w 175 roku pojawiła się „Prawdziwa Historia” Lukiana z Samosat [Sam20], która jako pierwsza opisywała podróż kosmiczną. Jedną z barier w realizacji marzeń o tej podróży było napędzanie pojazdów kosmicznych. Do tej pory zaproponowano różne metody napędu tego typu maszyn, które można podzielić na [SBD18]:

- napędy odrzutowe
  - na paliwo chemiczne,
  - jonowe,
- wykorzystujące zewnętrzne siły
  - żagle słoneczne,
  - asysta grawitacyjna.

Wachlarz możliwości zastawiań robotów w przestrzeni kosmicznej jest szeroki. Roboty mogą wspomagać pracę ludzi na stacjach kosmicznych. Jednym z nich jest „Robonaut” – humanoidalny robot zdolny wykonywać eksperymenty i naprawy w przestrzeni kosmicznej [DMA<sup>+</sup>11]. Znajduje się on na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS). Innym robotem jest „CIMON-2” – sferyczny robot pełniący rolę asystenta i wsparcia psychicznego dla członków ISS [Wikb]. Roboty MRV (Mission Robotic Vehicle) [Nor], MEP (Mission Extension Pods) [Nor] i EROSS IOD (European Robotic Orbital Support Services in Orbit Demonstrator) [PIA] są tworzone z myślą o serwisowaniu satelitów znajdujących się na orbicie okołozemskiej. Nieproporcjonalnie mała do zakresu zastawiań robotów w kosmosie jest liczba możliwości ich napędzania.

Najpopularniejszą metodą napędzania robotów kosmicznych jest użycie napędu odrzutowego. Wykorzystuje on paliwo, które transportuje ze sobą. Stanowi ono główne źródło energii. Wiąże się to z dużo wyższymi kosztami misji. Gdy w przestrzeni kosmicznej robotowi napędzanemu napędem odrzutowym zabraknie paliwa, jest on skazany na wieczny dryf.

Asysta grawitacyjna wykorzystuje zakrzywienie czasoprzestrzeni wokół masywnego obiektu w przestrzeni kosmicznej [Ber23]. Pozwala zmienić kierunek prędkości i/lub zamienić energię potencjalną grawitacji w energię kinetyczną. Największą

wadą asysty grawitacyjnej jest warunek znalezienia odpowiednio masywnego obiektu i konieczność precyzyjnego obliczenia trajektorii lotu.

Żagiel słoneczny wykorzystuje zjawisko ciśnienia promieniowania, którego źródłem jest gwiazda [Geo73]. Użycie zewnętrznej siły będącej efektem działania tego zjawiska do napędzania robota eliminuje konieczność transportu paliwa i znacząco zmniejsza ryzyko awarii robota (zmniejszenie ilości ruchomych części).

Pierwszą misją w przestrzeni kosmicznej, w której z sukcesem wykorzystano żagiel słoneczny, była misja IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) przeprowadzona przez Japońską Agencję Eksploracji Aerokosmicznej (w skrócie JAXA) [Wikd]. Rozpoczęta w 2010 roku misja polegała na rozłożeniu żagla i demonstracji napędzania nim robota, kontroli lotem za pomocą elementów ciekłokrystalicznych i generowania energii elektrycznej przez ogniwa słoneczne umieszczone bezpośrednio na żaglu. Potwierdziła założenia teoretyczne dotyczące siły ciągu generowanej przez żagiel. Zakończyła się sukcesem, spełniając każdy z wymienionych wcześniej celów misji. Na rysunku 1.1 przedstawiono rozłożony żagiel misji IKAROS w przestrzeni kosmicznej.

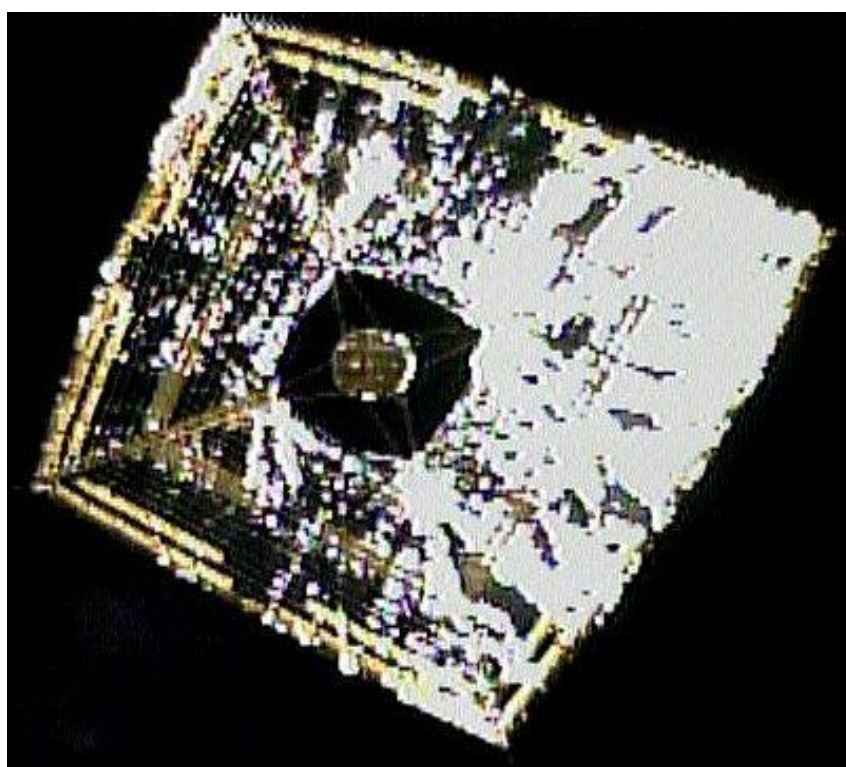
Kolejną misją wykorzystującą żagiel słoneczny była misja „LightSail 1” przeprowadzona w 2015 roku przez „The Planetary Society” we współpracy z NASA [The]. Jej celem było rozłożenie żagla słonecznego na niskiej orbicie okołoziemskiej. Misja „LightSail 2” będąca następczynią misji „LightSail 1” zakładała demonstrację lotu przy użyciu żagla słonecznego na orbicie 720 km nad powierzchnią Ziemi. Zastosowanie żagla słonecznego pozwoliło na zwiększenie apogeum orbity o 2 kilometry [Wik23].

Konstruktorzy żagli słonecznych muszą zmierzyć się wyzwaniem, którym jest złożenie żagla na czas transportu i rozłożenie go w przestrzeni kosmicznej. Potencjalnym rozwiązaniem tego problemu jest użycie origami do opracowania metody bezpiecznego i ściśle określonego sposobu składania i rozkładania żagla [SG<sup>+</sup>11]. Twórcy origami stworzyli bowiem wiele modeli, które umożliwiają transformację płaskiego arkusza materiału do struktury przestrzennej o pożądanym parametrach.

Celem niniejszej pracy jest analiza możliwości zastosowania matematycznych podstaw technik origami przy konstrukcji żagli słonecznych dedykowanych napędzaniu robotów kosmicznych. Część teoretyczna pracy polega na przeglądzie struktur modeli origami i metod ich opisu, porównaniu ich własności, ocenie przydatności zastosowania w napędach robotów kosmicznych. Część praktyczna obejmuje budowę mechanizmu rozkładania i sposobu sterowania żagla.

Układ pracy jest następujący. W drugim rozdziale przytoczone zostały podstawowe własności żagli słonecznych, zjawisko ciśnienia promieniowania, które wykorzystują, metody sterowania żaglami kosmicznymi i przykładowe trajektorie, po których mogą się poruszać. W rozdziale trzecim omówiono podstawowe zasady origami, zaproponowano modele origami reprezentujące możliwe sposoby składania żagli słonecznych i zasymulowano ich składanie. Rozdział czwarty zawiera opis projektowania mechanizmu rozkładania żagla. Rozdział piąty podsumowuje całość.





Rysunek 1.1 Żagiel słoneczny misji kosmicznej IKAROS [[Wikd](#)]



# Rozdział 2

## Żagiel słoneczny

Jak wspomniano we wstępie żagle słoneczne są napędem wykorzystującym zjawisko ciśnienia promieniowania. W tym rozdziale zostanie omówione to zjawisko fizyczne, wynikające z niego pożądane własności żagli oraz wady i zalety użycia tego rodzaju napędu kosmicznego. Na koniec wskażemy przykładowe ścieżki, po których może poruszać się robot wyposażony w taki żagiel.

### 2.1 Ciśnienie promieniowania

W 1610 roku Jan Kepler zasugerował, że istnieje zjawisko fizyczne, którego efektem jest zakrzywienie ogona komety w kierunku przeciwnym do Słońca [Kep10]. Zjawiskiem, o którym myślał Kepler jest ciśnienie promieniowania. James Maxwell wykazał, że zjawisko to wynika z jego równań dotyczących elektromagnetyzmu – fale elektromagnetyczne posiadają pęd [Max65]. Zjawisko to polega na wymianie pędu pomiędzy fotonami a obiektem na który padają.

Siła działająca na obiekt generowana przez ciśnienie promieniowania wynosi [Geo73]

$$F = (\beta + 1) \frac{G_{sc}}{cR^2} A \cos \alpha, \quad (2.1)$$

gdzie  $\beta$  – współczynnik odbicia światła (% światła odbijany przez żagiel),  $G_{sc}$  – stała słoneczna ( $1362 \text{ W/m}^2$ ),  $c$  – prędkość światła w próżni ( $2,9 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ),  $A$  – powierzchnia żagla ( $\text{w m}^2$ ),  $\alpha$  – kąt padania światła,  $R$  – odległość od Słońca ( $\text{w AU}$ ).

Ciśnienie promieniowania jest zjawiskiem generującym małe siły. Przykładowo, na żagiel o powierzchni  $110 \cdot 10^3 \text{ m}^2$  znajdujący się w odległości 1 AU od Słońca, pod wpływem padającego prostopadle do jego powierzchni promieniowania działa siła około 1N. Aby siła generowana przez ciśnienie promieniowania była większa niż siła grawitacji, należy użyć żagla, którego powierzchnia wyrażona w metrach kwadratowych będzie większa niż

$$A_0 = 6512 \cdot m, \quad (2.2)$$

gdzie  $m$  – masa obiektu wyrażona w kilogramach i to przy założeniu, że całe światło padające prostopadle na żagiel jest odbijane.

## 2.2 Własności żagla

Korzystając ze wzoru (2.1) na siłę ciśnienia promieniowania działającą na żagiel możemy określić pożądane własności żagla prowadzące do osiągnięcia jak największego przyspieszenia:

- możliwie jak największa powierzchnia – umożliwi wygenerowanie jak największej siły popychającej robota;
- wysoki współczynnik odbicia światła – w idealnym wypadku całe światło padające na żagiel jest odbijane, a nie pochłaniane. Użycie materiałów o wysokim współczynniku odbicia światła jest kluczowe przy konstrukcji tego typu napędu. Proponowanym materiałem jest aluminizowany Mylar [SMPS17], który odbija ponad 95% światła;
- możliwie płaska powierzchnia – aby wykorzystać całe odbijane światło do napędzenia żagla, nie należy go rozpraszać. Rozpraszanie może spowodować zmniejszenie siły generowanej przez ciśnienie promieniowania lub/i powoduje ruch obrotowy robota;
- mała masa robota – według II zasady dynamiki Newtona

$$a = \frac{F_w}{m}, \quad (2.3)$$

gdzie  $a$  – przyspieszenie,  $F_w$  – siła wypadkowa,  $m$  – masa, aby przyspieszenie było jak największe, to masa powinna być jak najmniejsza;

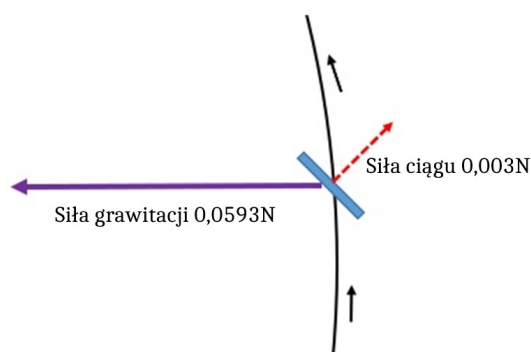
- środek masy robota powinien znajdować się w środku geometrycznym żagla – inne położenie środka masy może spowodować niepożądany ruch obrotowy robota.

Największą zaletą żagli słonecznych jest brak konieczności transportu paliwa. Pozwala to na planowanie długich podróży międzygwiazdnych i znacznie redukuje koszty misji. Brak użycia konwencjonalnych napędów kosmicznych zmniejsza także mocno wagę całego robota, co może umożliwić transportowanie większych ładunków (przy zastosowaniu odpowiednio większych żagli) i mniejszą awaryjność ze względu na brak wielu mechanicznych, skomplikowanych komponentów napędu.

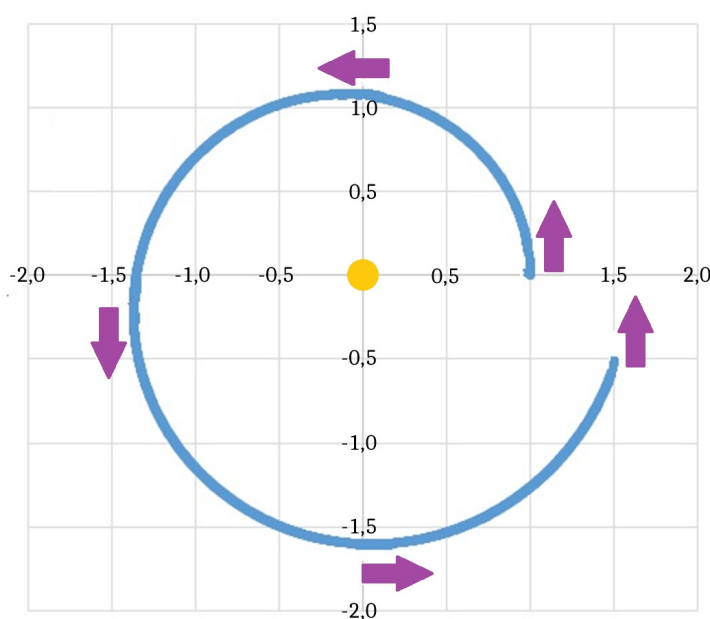
Wadami żagli słonecznych jest małe przyspieszenie generowane przez nie, które wynika z małej wartości ciśnienia promieniowania, a także konieczność poruszania się po odpowiednich, wcześniej dokładnie zaplanowanych trajektoriach.

## 2.3 Ścieżki ruchu

W poprzednim podrozdziale wspomniano o zależności pomiędzy powierzchnią żagla, a masą całego obiektu napędzanego żaglem wyrażonej wzorem (2.2). Założono, że obiekt porusza się ruchem prostoliniowym w kierunku równoległym do promienia wodzącego obiektu napędzanego żaglem, a siła grawitacji i siła generowana przez żagiel były jedynymi siłami działającymi na obiekt. Jest to sytuacja



Rysunek 2.1 Zastosowanie żagla słonecznego – przykład pierwszy (na podstawie [Hur21])

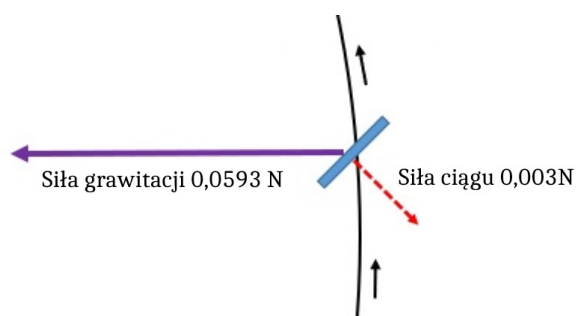


Rysunek 2.2 Zastosowanie żagla słonecznego – przykład pierwszy, ścieżka lotu (na podstawie [Hur21])

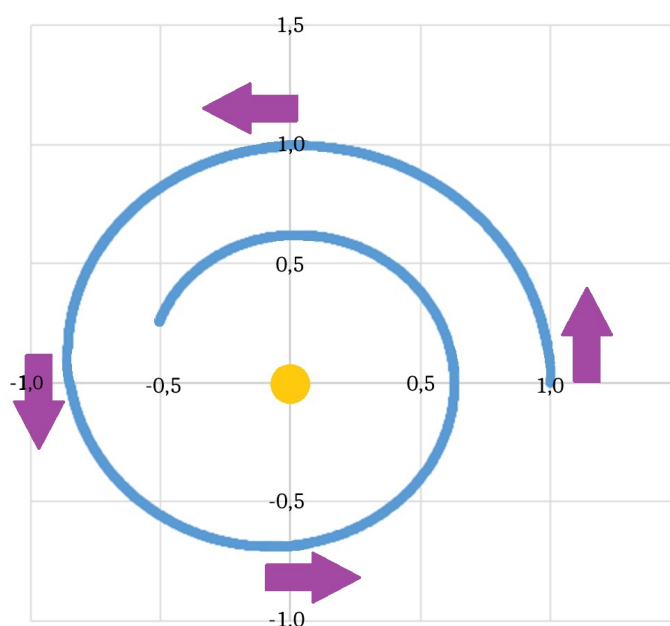
w której siła generowana przez żagiel musi być większa niż siła grawitacji, aby obiekt oddalał się od gwiazdy.

W innych szczególnych sytuacjach nie potrzebujemy, aby siła ciągu żagla przewyższała siłę grawitacji pochodzącą od gwiazdy [Hur21]. Zakładając, że obiekt poruszały się początkowo po orbicie zamkniętej dookoła gwiazdy, siła grawitacji powodowałaby utrzymanie obiektu na tej orbicie. W chwili rozłożenia żagla pojawiałaby się siła dodatkowa wynikająca z ciśnienia promieniowania. Byłoby to przyczyną zmiany szybkości obiektu, skutkującą zmianą odległości od gwiazdy. Poniższe przykłady to przedstawiają.

Rozważmy sytuację w której żagiel o masie 10 kg i powierzchni 656 m<sup>2</sup> porusza się po orbicie początkowej o promieniu 1 AU wokół Słońca pod kątem 45° do normalnej do orbity w sposób pokazany na rysunku 2.1. Siła generowana przez żagiel wynosi w tym przypadku 0,003 N i powoduje zwiększenie szybkości obiektu



Rysunek 2.3 Zastosowanie żagla słonecznego – przykład drugi (na podstawie [Hur21])

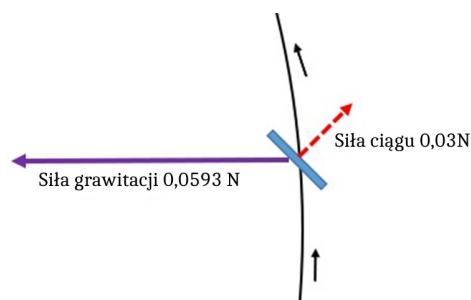


Rysunek 2.4 Zastosowanie żagla słonecznego – przykład drugi, ścieżka lotu (na podstawie [Hur21])

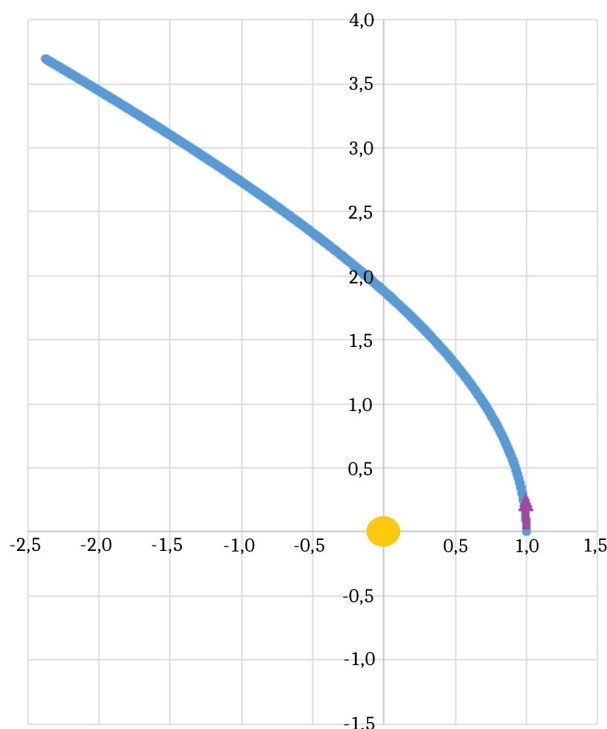
i odległości od gwiazdy. Zakładając, że orientacja żagla względem słońca pozostanie niezmienna, obiekt z tak rozpostartym żaglem przez 18 miesięcy w sposób pokazany na rysunku 2.2 i znajdzie się w odległości około 1,6 AU od Słońca.

W drugim przypadku, wspomniany wcześniej żagiel porusza się po orbicie początkowej o promieniu 1 AU od Słońca pod kątem  $-45^\circ$  do normalnej do orbity w sposób pokazany na rysunku 2.3. Siła generowana przez żagiel wynosi w tym przypadku również 0,003 N i spowoduje zmniejszenie szybkości obiektu i odległości. Zakładając, że orientacja żagla względem Słońca się nie zmieni, przez 12 miesięcy będzie on poruszał w sposób pokazany na rysunku 2.4 i znajdzie się w odległości około 0,56 AU od Słońca.

W trzecim przypadku, pokazanym na rysunku 2.5 rozważmy użycie żagla o powierzchni  $6570 \text{ m}^2$  i masie 10kg poruszającego się po orbicie początkowej o promieniu 1 AU od Słońca pod kątem  $45^\circ$  do normalnej do orbity. Siła generowana



Rysunek 2.5 Zastosowanie żagla słonecznego – przykład trzeci (na podstawie [Hur21])

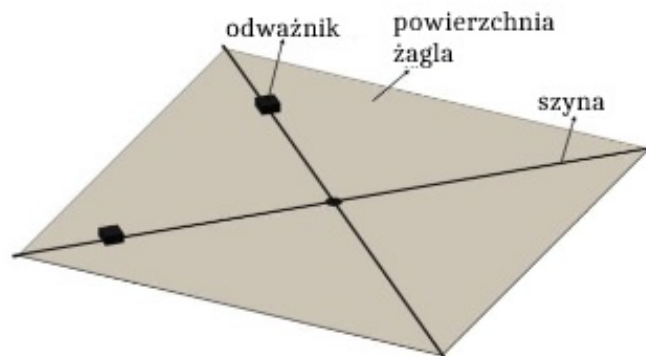


Rysunek 2.6 Zastosowanie żagla słonecznego – przykład trzeci, ścieżka lotu (na podstawie [Hur21])

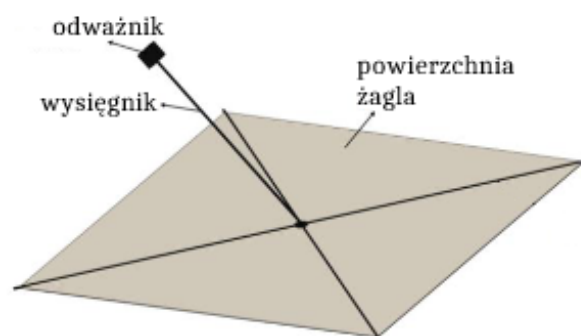
przez żagiel wynosi w tym przypadku  $0,03\text{N}$ . Zakładając, że jego orientacja względem Słońca się nie zmienia, żagiel przez 9 miesięcy będzie poruszał się w sposób pokazany na rysunku 2.6 i znajdzie się w odległości około  $4,4\text{ AU}$  od Słońca.

## 2.4 Metody sterowania żaglem kosmicznym

Podstawowym założeniem przy budowie żagli słonecznych jest brak konieczności przewożenia paliwa. Do zmiany orientacji robota, a w konsekwencji kierunku jego ruchu, proponuje się wykorzystanie zjawiska ciśnienia promieniowania działającego na żagiel. Metody wykorzystujące to zjawisko możemy podzielić na techniki



Rysunek 2.7 Odważniki na szynach przymocowanych do żagla (na podstawie [ATL10])



Rysunek 2.8 Odważnik zamontowany na wysięgniku (na podstawie [ATL10])

zmieniające środek masy robota i techniki zmieniające punkt przyłożenia siły działającej na żagiel powodowanej przez zjawisko ciśnienia promieniowania [GM19]. Obie metody powodują pojawienie się momentu siły wywołującego ruch obrotowy.

Jednym ze sposobów na zmianę środka masy robota, może być zamontowanie odważników na szynach równoległych do powierzchni żagla przymocowanych do robota w sposób pokazany na rysunku 2.7 [Die01]. Sterując położeniem odważników można zmienić położenie środka masy robota.

Innym sposobem na zmianę środka masy robota, może być zamontowanie odważnika na wysięgniku w sposób pokazany na rysunku 2.8 [ATL10]. Sterując odchyleniem wysięgnika od osi prostopadłej do powierzchni żagla i przechodzącej przez środek geometryczny robota, można zmienić położenie środka masy robota.

Zmiana punktu przyłożenia siły działającej na żagiel może być spowodowana zmianą współczynnika odbicia światła na niektórych elementach żagla. Podczas wspomnianej we wstępie misji IKAROS, testowane były panele LCD. Przykładając napięcie do paneli możliwa była zmiana współczynnika odbicia. Powodowało to zmianę rozkładu ciśnienia promieniowania i przesunięcie siły z niego wynikającej [Wikd].



# Rozdział 3

## Origami

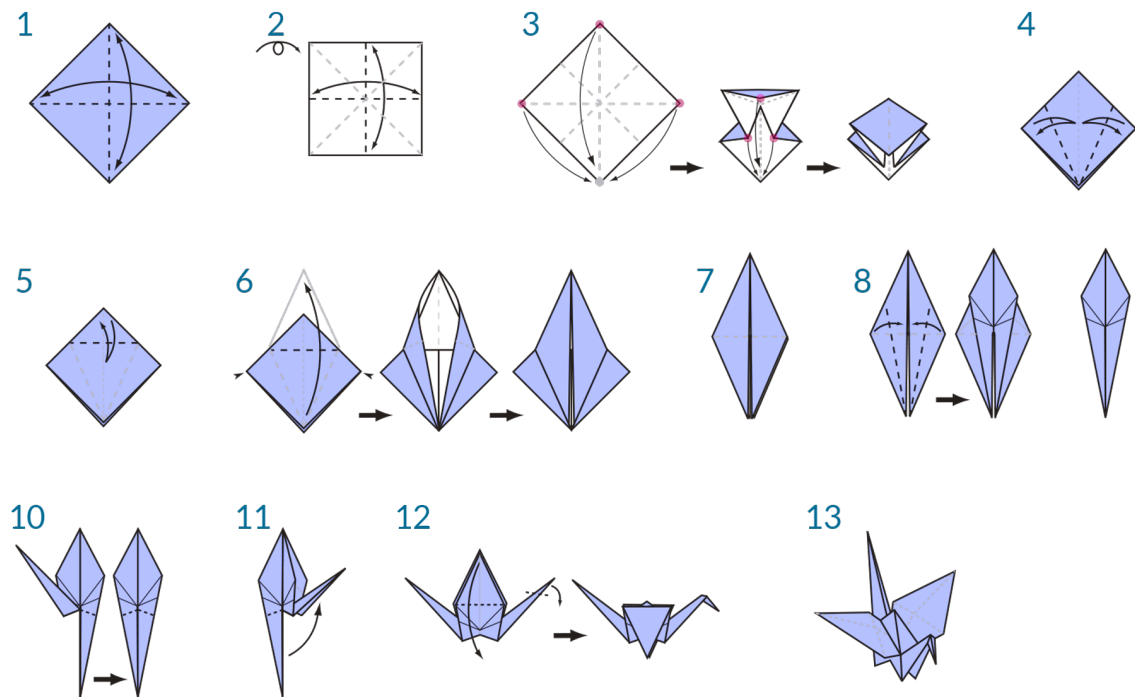
Origami jest tradycyjną sztuką składania papieru wywodzącą się z Chin i rozwijaną w Japonii [Wikc]. Przez długi czas origami było jedynie zabawą. Za sprawą Aki-ry Yoshizawy, japońskiego mistrza origami, stało się ono prawdziwą sztuką [Wika]. Przypisuje się mu stworzenie ponad 50 000 różnych modeli. Opracował on również metodę opisu zgięć i diagramu „krok po kroku”, którego przykład przedstawia rysunek 3.1. Pod koniec XX wieku origami przeszło transformację z dziedziny sztuki do dziedziny inżynierii. Stało się to za sprawą matematyków Jacques’a Justina i Humiaki Huzity, którzy odkryli siedem aksjomów origami. Justin opublikował swoje rozważania w 1986 roku [Jus86]. Odkrycie podstawowych zasad origami doprowadziło do powstania innych teorii dotyczących projektowania modeli. Matematyczny opis sztuki pozwolił na dalsze badania nad przekształcaniem płaskich powierzchni w trójwymiarowe bryły. W tym czasie powstał także nowy sposób zapisu instrukcji – siatka zgięć, przedstawiona na przykładzie na rysunku 3.2.

W tym rozdziale omówimy podstawowe zagadnienia dotyczące zasad origami oraz rodzaje opisu ich składania, przedstawimy wybrane modele origami, mogące znaleźć zastosowanie w żaglach słonecznych i zasymulujemy ich składanie. Na zakończenie porównamy modele pod kątem wykorzystania ich w roli żagla słonecznego.

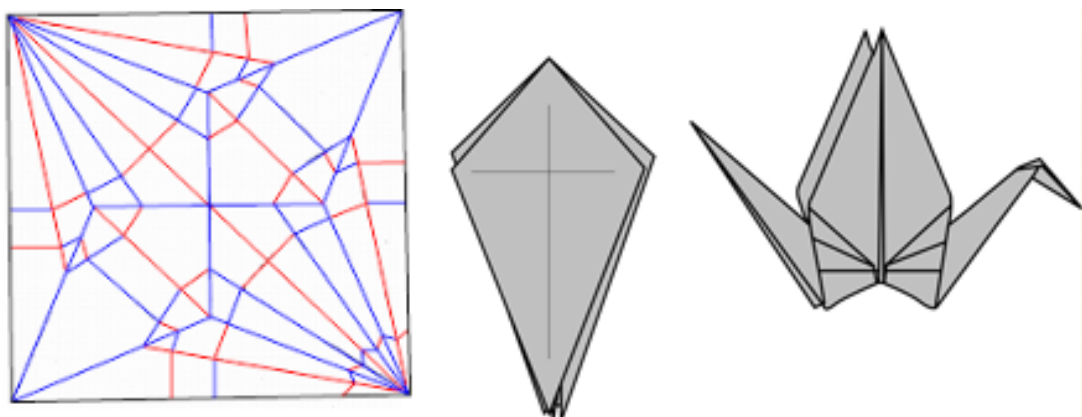
### 3.1 Siatka zgięć

Siatka zgięć jest sposobem zapisu origami, który przedstawia model po rozłożeniu. Często przedstawia zgięcia w różnych kolorach pomagając odnaleźć pierwsze zgięcia w celu rozwiązania siatki i wskazuje ich kierunek. Wyróżnia się dwa kierunki zgięć: „góra” i „dolina”, które pokazano na rysunku 3.3. Kierując się zasadami origami i odnajdując zależności pomiędzy zgięciami (kąty, odległości i kształt), możliwe jest odwzorowanie „bazy”, czyli modelu bez zgięć wykończeniowych. Na podstawie zgięć oryginalnego modelu, składa się zgięcia wykończeniowe, otrzymując gotowy model.

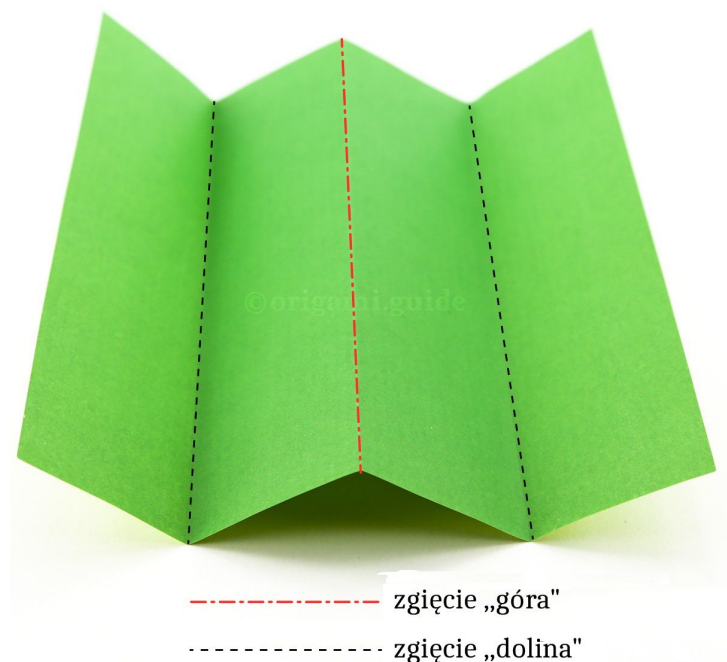
Wynalezienie siatki zgięć umożliwiło stworzenie oprogramowania służącego projektowaniu i symulacji modelu origami, takiego jak „Orietida” [Oria], „TreeMaker” [Tre] czy „Origami Simulator” [Sim]. Ten ostatni pozwala na obracanie modelu w dowolnej osi i regulację kątów zgięć, co umożliwia obserwację procesu składania.



Rysunek 3.1 Diagram „krok po kroku” łabędzia



Rysunek 3.2 Siatka zgięć, baza i gotowy model łabędzia



Rysunek 3.3 Kierunki zgięć (na podstawie [Orib])

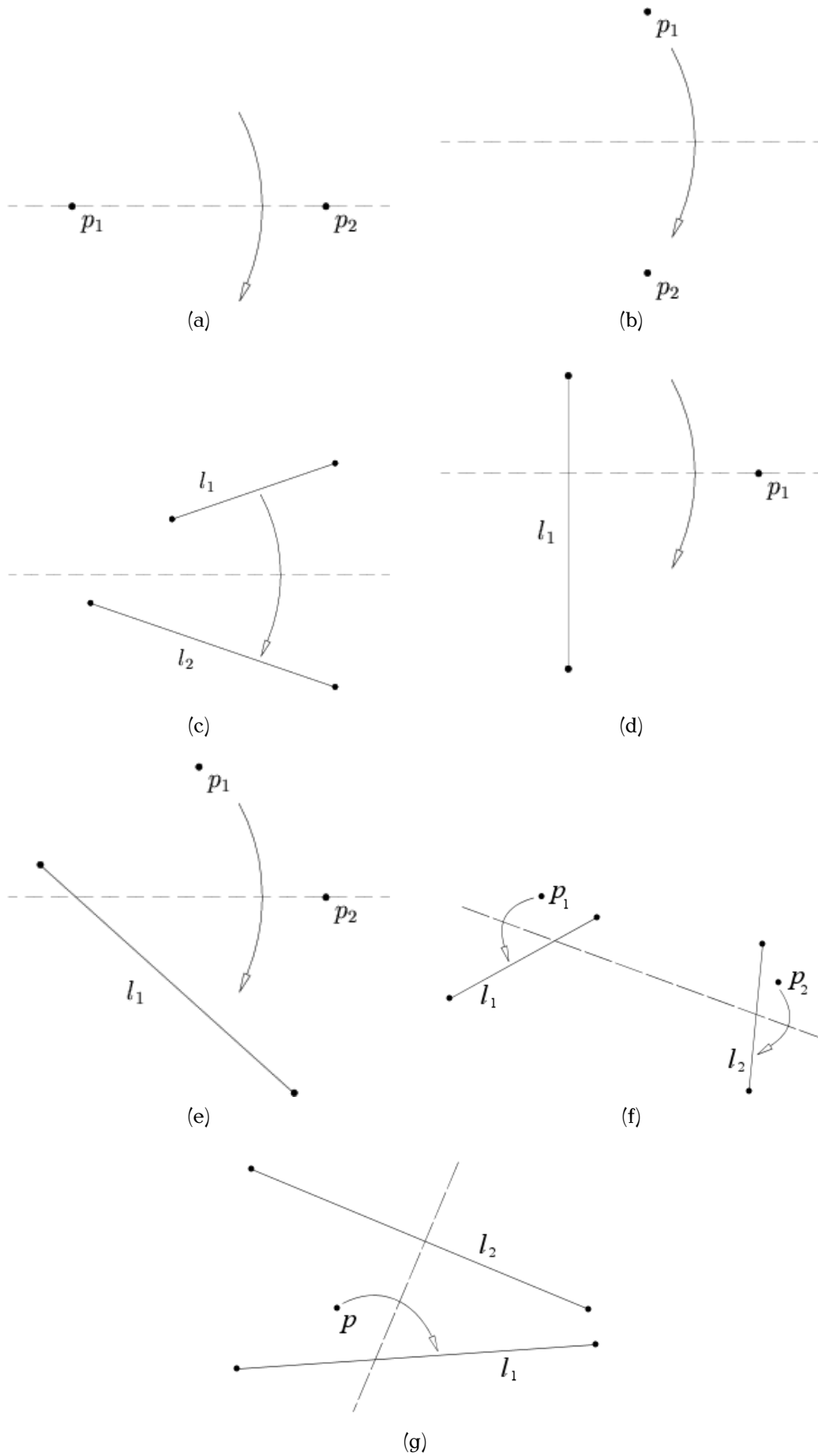
## 3.2 Zasady origami

Aksjomaty Huzita-Hatori stanowią podstawę matematycznego opisu origami. Opisują podstawowe zależności pomiędzy prostymi i punktami, a zgięciami. Zasady dwóch kolorów, Kawasakiego i Maekawy-Justina pozwalają na etapie projektowania stwierdzić, czy powstały model będzie płaski.

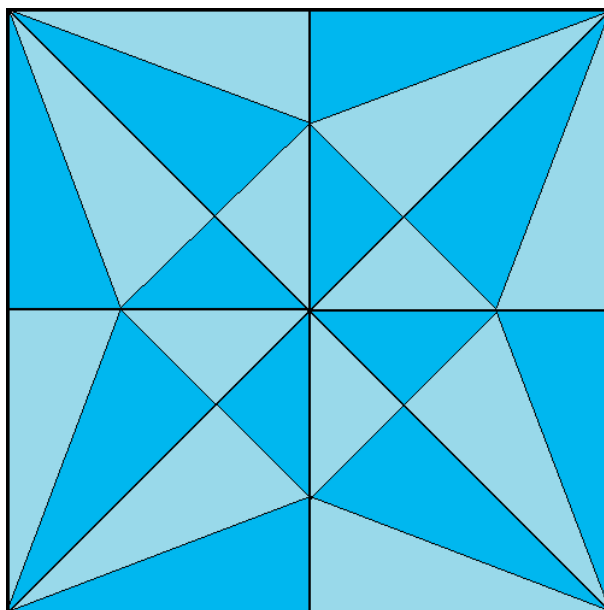
### 3.2.1 Aksjomaty Huzita–Hatori

Aksjomaty Huzita-Hatori zilustrowane na rysunku 3.4 są podstawowymi zasadami origami. Odkryte przez Jacques’a Justina w 1986 roku stanowią matematyczną podstawę origami [Jus86]. Siedem podstawowych aksjomatów origami to:

1. Dla danych dwóch różnych punktów  $p_1$  i  $p_2$  istnieje jedno przechodzące przez nie zgięcie.
2. Dla danych dwóch różnych punktów  $p_1$  i  $p_2$  istnieje jedno zgięcie umieszczające punkt  $p_1$  na punkcie  $p_2$ .
3. Dla danych dwóch różnych prostych  $l_1$  i  $l_2$  istnieje jedno zgięcie umieszczające prostą  $l_1$  na prostej  $l_2$ .
4. Dla danej prostej  $l_1$  i punktu  $p_1$  istnieje jedno zgięcie prostopadłe do  $l_1$  przechodzące przez  $p_1$ .
5. Dla danej prostej  $l_1$  i dwóch różnych punktów  $p_1, p_2$  istnieje jedno zgięcie przechodzące przez  $p_2$  i umieszczające  $p_1$  na  $l_1$ .



Rysunek 3.4 Siedem aksjomatów origami



Rysunek 3.5 Zasada dwóch kolorów [Wike]

6. Dla danych prostych  $l_1$  i  $l_2$  oraz różnych punktów  $p_1$  i  $p_2$  nieleżących na prostych  $l_1$  i  $l_2$  istnieje jedno zgięcie umieszczające  $p_1$  na  $l_1$  i  $p_2$  na  $l_2$ .
7. Dla danych dwóch różnych prostych  $l_1, l_2$  nieprostokątnych do siebie i punktu  $p$  istnieje jedno zgięcie prostopadłe do  $l_2$  umieszczające  $p$  na  $l_1$ .

### 3.2.2 Dodatkowe zasady origami

Zasady origami wymienione w tym podrozdziale służą określeniu, czy model powstały z siatki zgięć będzie płaski.

#### Zasada dwóch kolorów

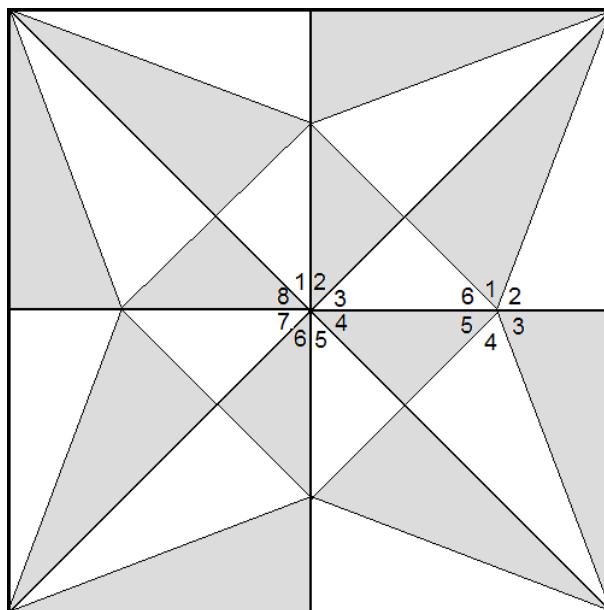
Dzieląc zgięciami kartkę na różne wycinki możemy zauważyć, że jeśli możliwe jest pomalowanie dwoma kolorami wycinków kartki w taki sposób, że stykające się zgięciami wycinki są różnych kolorów, to powstały model będzie płaski. Ilustruje to na rysunek 3.5.

#### Zasada Kawasaki

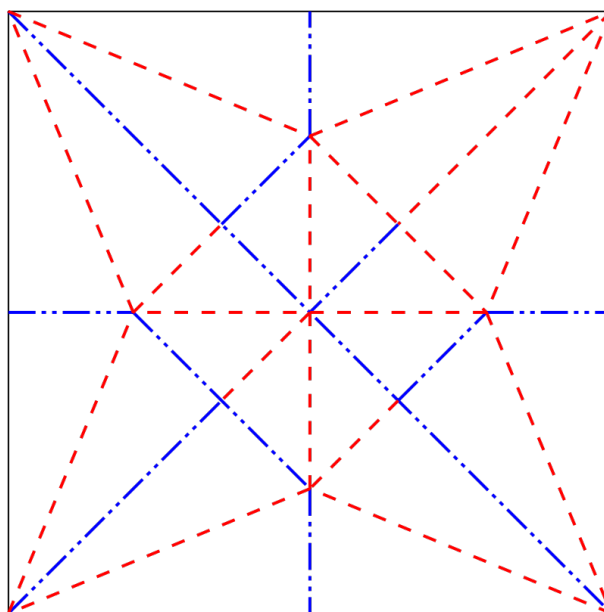
Jeśli ponumerujemy kąty dookoła przecięcia się wielu zgięć i kąty o numerach parzystych (i nieparzystych) sumują się do 180 stopni, to otrzymamy płaski model. Ilustruje to rysunek 3.6.

#### Zasada Maekawy-Justina

Jeżeli różnica zgięć „górnego” i „dolnego” wychodzących z każdego wewnętrznego wierzchołka jest równa 2, to otrzymamy płaski model. Na rysunku 3.7 możemy zauważyć,



Rysunek 3.6 Zasada Kawasakiego [Wike]

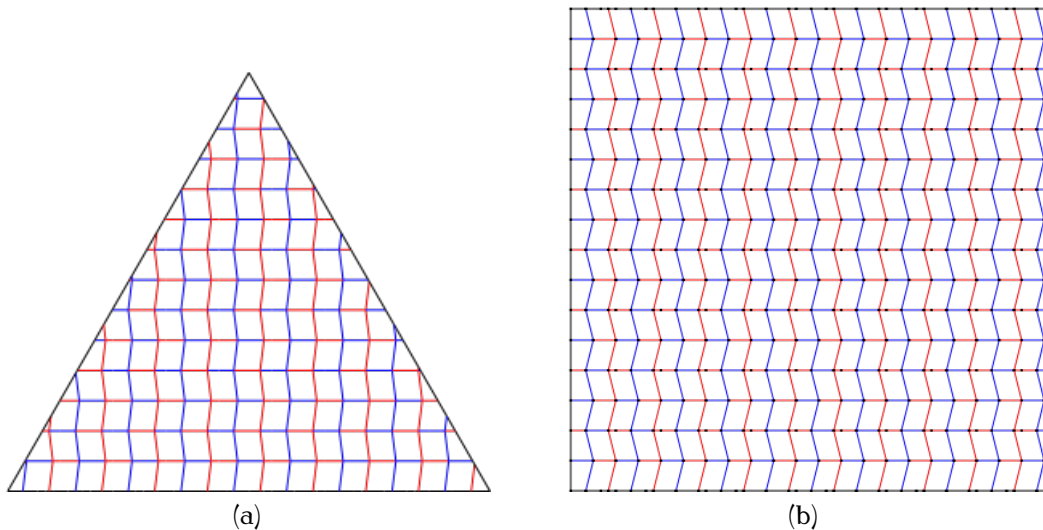


Rysunek 3.7 Zasada Maekawy-Justina [Wike]

że różnica zgięć „górną” i „dolną” wychodzących z każdego wewnętrznego wierzchołka wynosi 2.

### 3.3 Wybrane modele

Korzystając ze wspomnianych wcześniej w tym rozdziale zasad oraz z oprogramowania „Oriedita” [Oria] opracowano 5 siatek zgięć reprezentujących różne modele origami. Składanie wszystkich modeli zasymulowano w programie „Origami Simulator” [Sim]. Dwie z nich oparto na złożeniu Miury, które metodą składania po-



Rysunek 3.8 Siatki zgięć modeli z grupy A: a) trójkąt b) kwadrat

przez utworzenie siatki równoległoboków [Kor85]. Te modele nazwano „grupą A”. Trzy kolejne modele opracowano wykorzystując mechanizm płaskiego skrętu wewnętrznej części modelu, którego kształt bazuje na wielokątach foremnych. Te modele nazwano „grupą B”.

### 3.3.1 Grupa A

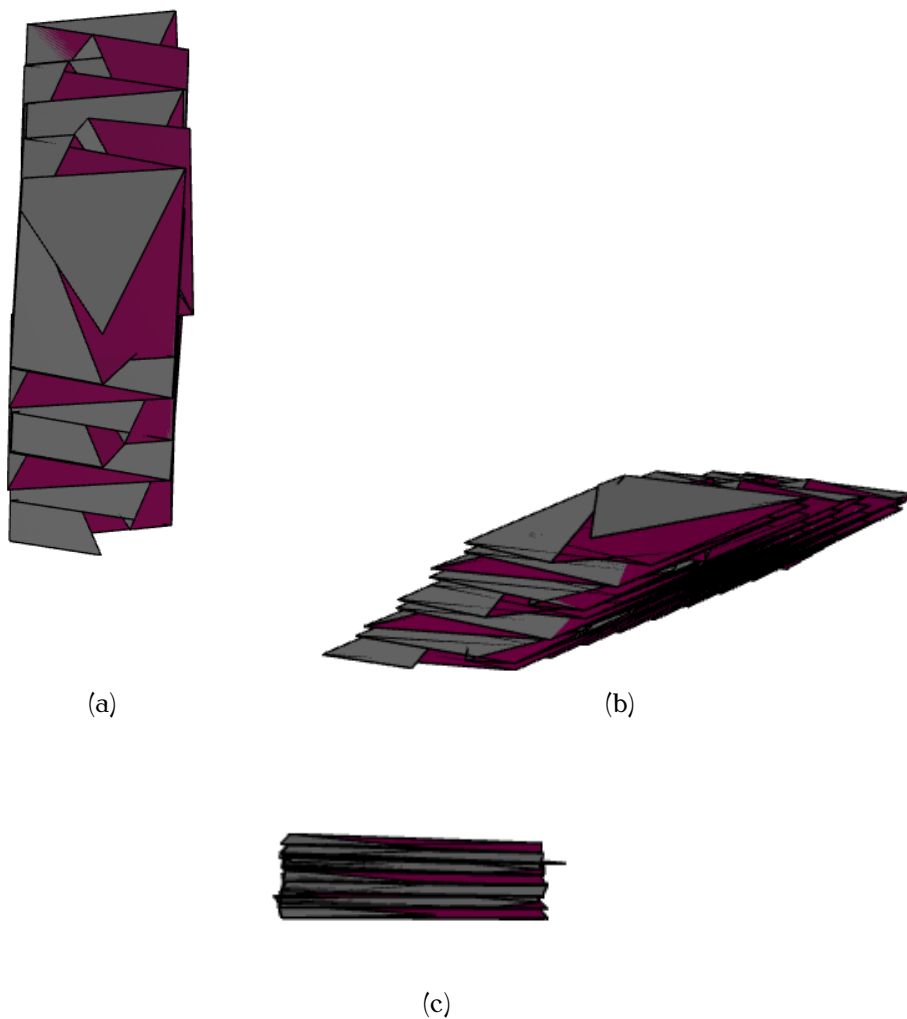
Modele z grupy A powstają poprzez złożenie siatek zgięć przedstawionych na rysunku 3.8, a ich symulacje na rysunkach 3.9 i 3.10. Po złożeniu, modele z tej grupy są płaskie. Uniemożliwia to umieszczenie robota wewnątrz tej struktury i rozwinięcie żagla dookoła robota. Możliwe jest jednak umieszczenie większej liczby robotów dookoła żagla i napędzania ich za jego pomocą lub wykorzystanie wielu identycznych struktur do stworzenia funkcjonalnego żagla rozwijającego się dookoła robota, jak pokazano na rysunku 3.11.

### 3.3.2 Grupa B

Siatki zgięć przedstawione na rysunku 3.12 opisują modele z grupy B. Symulacje tych modeli pokazano na rysunkach 3.13, 3.14 i 3.15. Użycie modeli z tej grupy umożliwia umieszczenie robota wewnątrz takiej struktury jak i większej liczby robotów dookoła niej. Przy złożeniu struktura żagla otacza robota. Ze względu na skręt wewnętrznej części, niemożliwe jest połączenie struktur w jedną większą, stanowiącą żagiel.

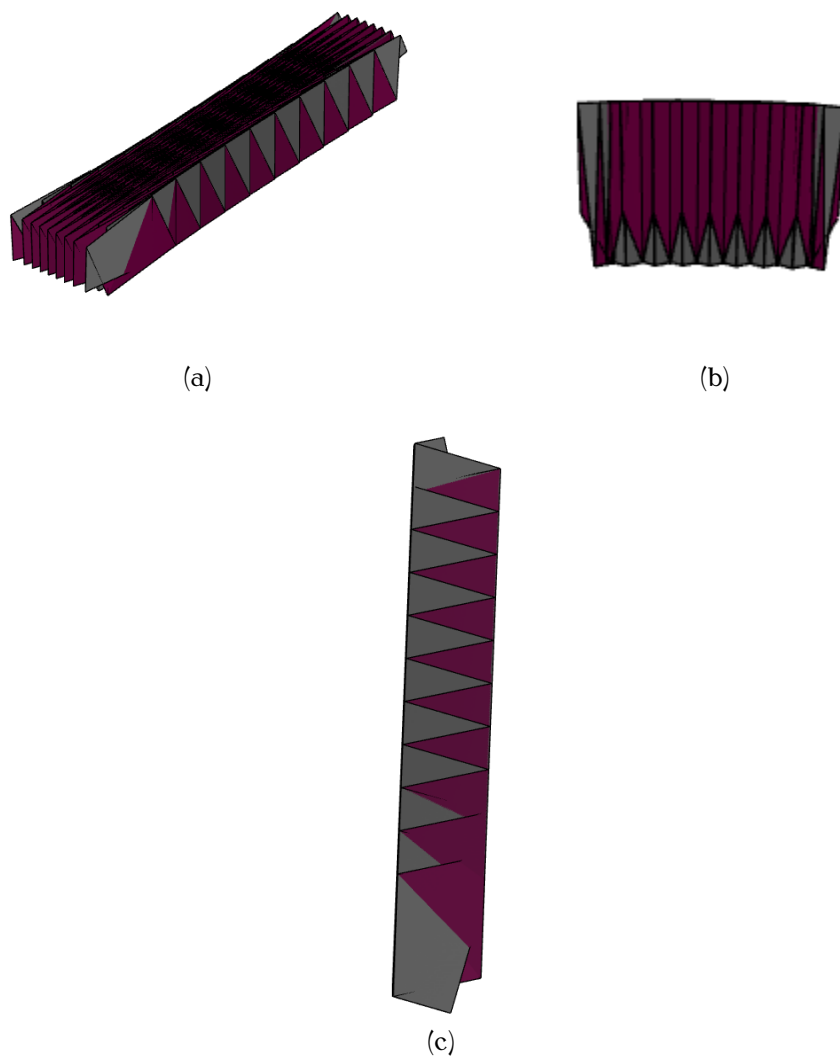
### 3.3.3 Porównanie

Modele z grupy A i B znacząco różnią się od siebie. Po złożeniu, modele z grupy A charakteryzują się płaską strukturą, co uniemożliwia umieszczenie wewnątrz takiej struktury robota, w przeciwieństwie do modeli z grupy B, składających się

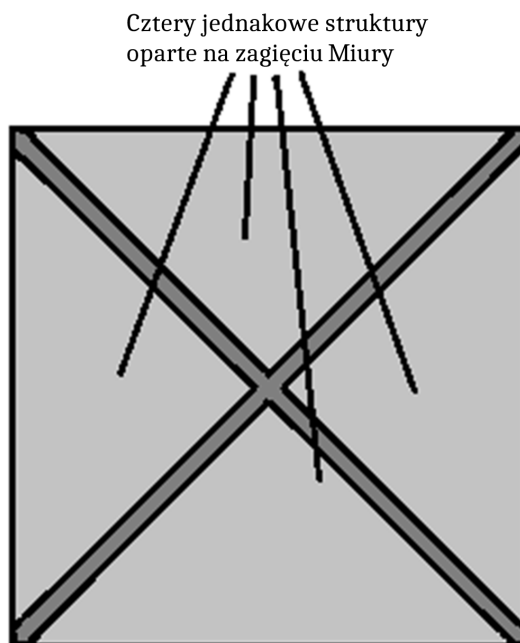


Rysunek 3.9 Symulacja złożonego modelu „trójkąt” z grupy A : a) widok z góry, b) rzut izometryczny c) widok z boku



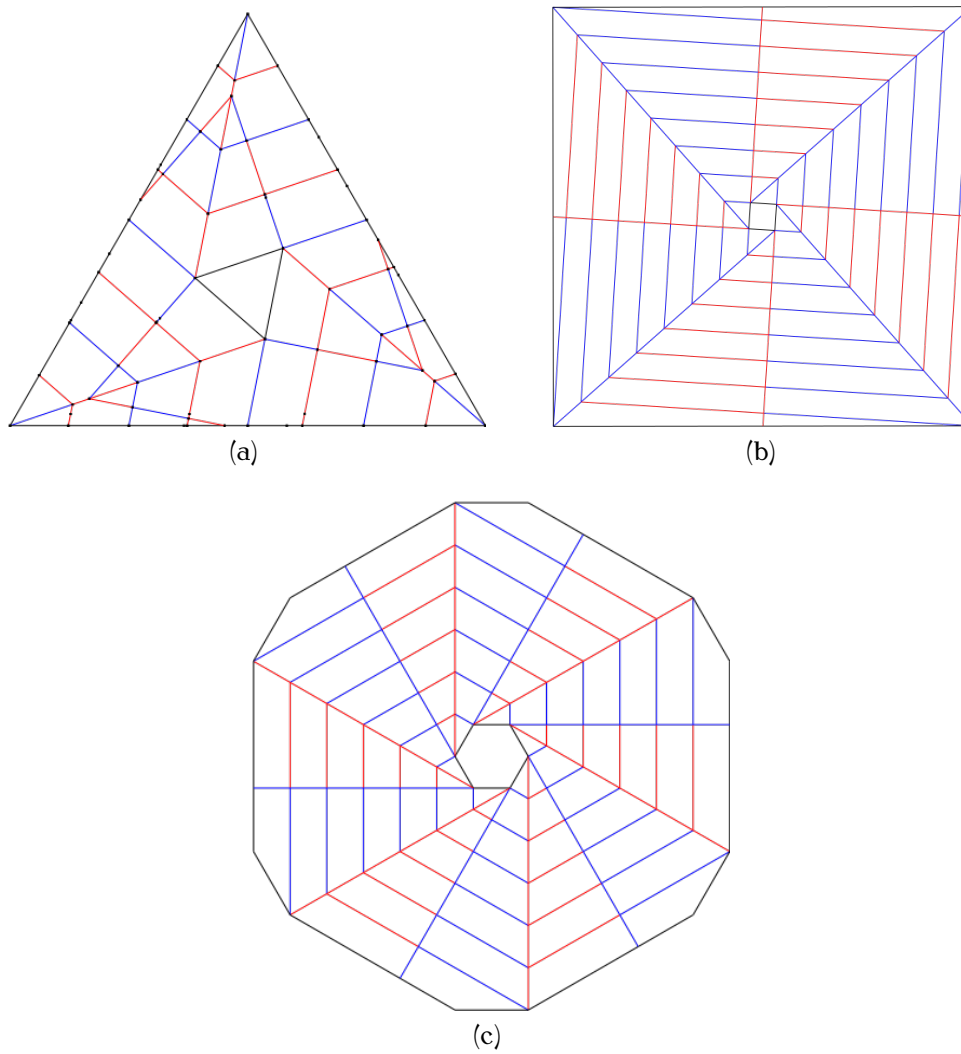


Rysunek 3.10 Symulacja złożonego modelu „kwadrat” z grupy A: a) rzut izometryczny, b) widok z boku, c) widok z góry

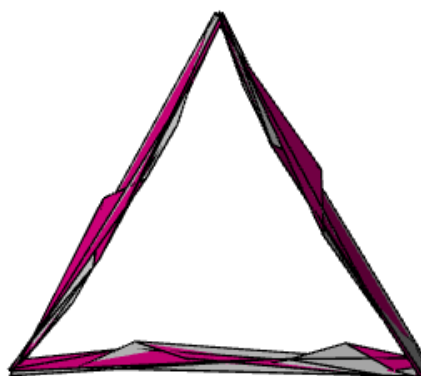


Rysunek 3.11 Żagiel oparty o cztery trójkąty wykorzystujące złożenie Miury

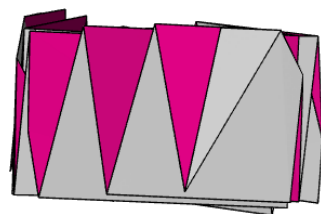
w trójwymiarowe struktury otaczające robota. Modele z grupy A można jednak łączyć ze sobą w większe struktury, które umożliwią umieszczenie robota w ich wnętrzu, co jest niemożliwe w przypadku modeli z grupy B. Modele z obu grup pozwalają na umieszczenie większej ilości robotów dookoła struktury żagla.



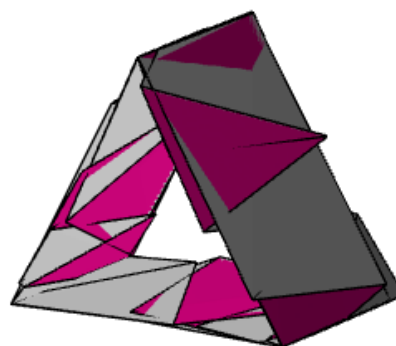
Rysunek 3.12 Siatki zgieć modeli z grupy B: a) trójkąt, b) kwadrat, c) sześciokąt



(a)

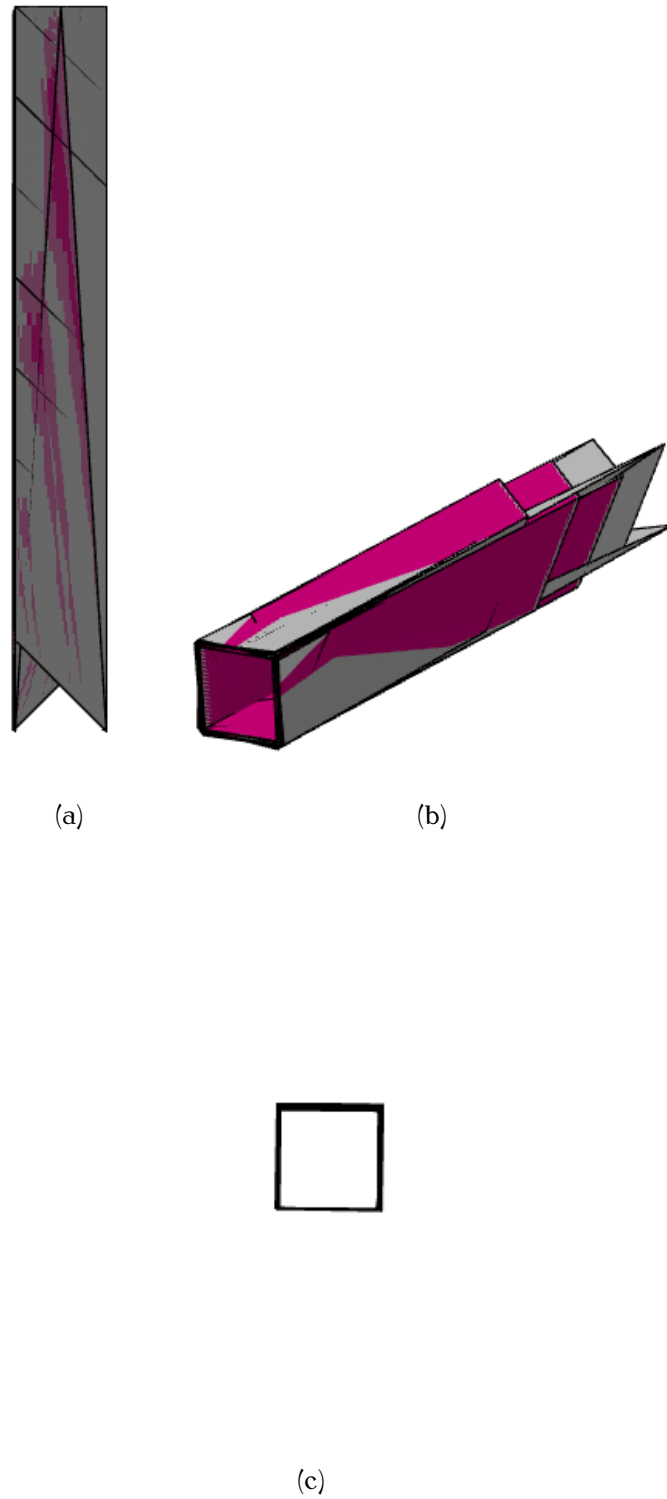


(b)

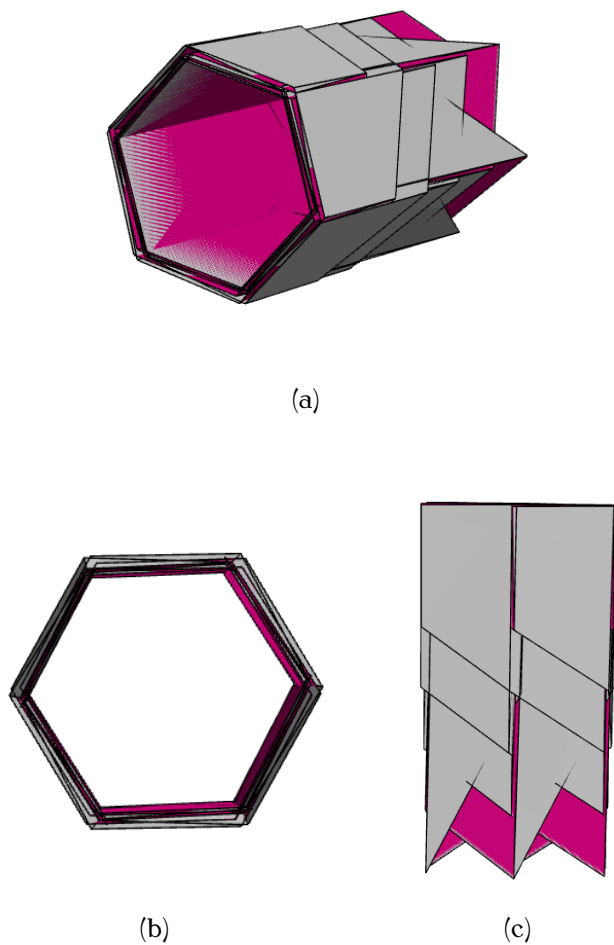


(c)

Rysunek 3.13 Symulacja złożonego modelu „trójkąt” z grupy B: a) widok z góry, b) widok z boku c) rzut izometryczny



Rysunek 3.14 Symulacja złożonego modelu „kwadrat” z grupy B: a) widok z boku, b) rzut izometryczny c) widok z góry



Rysunek 3.15 Symulacja złożonego modelu „sześciokąt” z grupy B: a) rzut izometryczny, b) widok z góry, c) widok z boku

# Rozdział 4

## Projekt żagla

W tym rozdziale omówimy proces projektowania modelu żagla słonecznego, który składał się z wyboru materiałów oraz jednego z zaproponowanych we wcześniejszym rozdziale modeli origami i zaprojektowaniu odpowiedniego mechanizmu, zdolnego do rozłożenia tej struktury. Opiszemy także sposób w jaki owady rozkładają skrzydła, który był inspiracją podczas budowy mechanizmu rozkładania. Na zakończenie przedstawimy model żagla i zademonstrujemy jego rozkładanie.

### 4.1 Dobór struktury i materiału

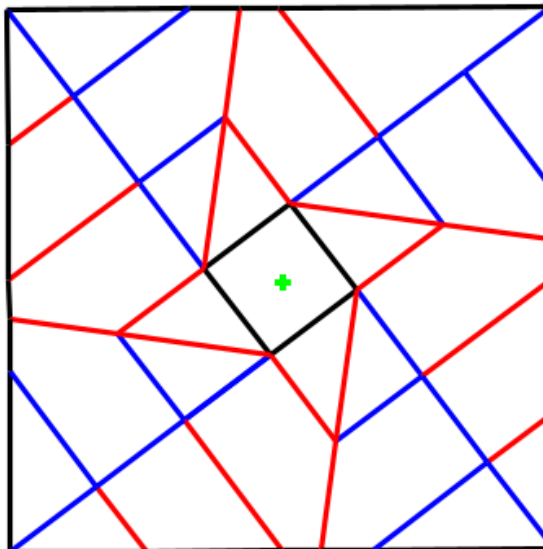
Do budowy modelu wybrano strukturę opartą na kwadracie z płaskim skrętem wewnętrznym, którego siatkę zgięć przedstawiono na rysunku 3.12 b). Zmodyfikowano tę siatkę zwiększając rozmiar wewnętrznego kwadratu. Przedstawia to rysunek 4.1. Jest to struktura o małej liczbie zgięć w stosunku do tych opartych na zgięciu Miury. Ponadto, wszystkie zgięcia w modelu przecinają się pod kątem  $45^\circ$  lub  $90^\circ$ , co uprościło składanie modelu,

W misjach wymienionych we wstępie żagle słoneczne wykonane zostały z aluminizowanego Mylaru lub folii poliamidowej. Do modelu żagla pierwotnie zakładano użycie cienkiego papieru pakunkowego, ale ze względu na załamywanie się papieru między zgięciami, zdecydowano się na użycie folii NRC z doklejoną warstwą folii aluminiowej. Z połączenia tych dwóch tworzyw uzyskano materiał wytrzymały na wielokrotne złożenia i utrzymujący sztywność pomiędzy zgięciami.

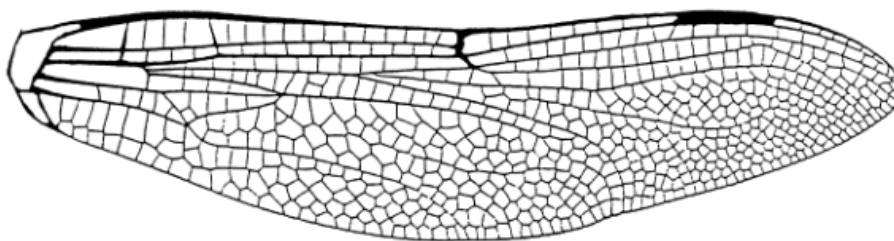
### 4.2 Dobór mechanizmu rozkładania

We wspomnianych we wstępie misjach kosmicznych żagle słoneczne rozkładane były przy pomocy siły odśrodkowej poprzez wprawienie satelity w ruch dookoła własnej osi lub poprzez naciągnięcie żagla na wysięgniki. W tej pracy zbadano dwa sposoby na rozłożenie żagla wzorowane mechanizmem rozkładania skrzydeł przez owady.

Skrzydła owadów są zbudowane z powłok ciała (powłok skórnych) przyjmujących formę cienkiej, elastycznej membrany podzielonej żyłkami i liniami zagięć (ang. lines of flexion). W celu rozłożenia skrzydeł owad wprowadza do żyłek płyn ustrojowy – hemolimfę, co powoduje naprężenie żyłek i rozciągnięcie membrany.



Rysunek 4.1 Zmodyfikowana siatka zgięć modelu kwadratu z grupy B



Rysunek 4.2 Rozkład żyłek w skrzydle ważki [KPN98]

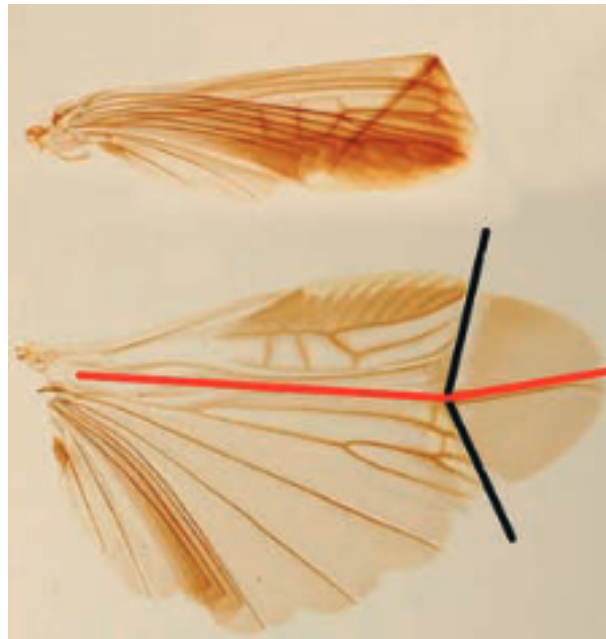
Układ linii zgięć ma wpływ na sposób składania skrzydeł i odginania ich w trakcie lotu [Woo92]. Rysunek 4.2 przedstawia przykładowy rozkład żyłek w skrzydle ważki. Rysunek 4.3 ilustruje linie zgięć i złożenie części skrzydła wzdłuż nich.

Mechanizmy rozkładające żagiel zademonstrowane w tym rozdziale starają się odwzorować mechanizm wykorzystywany przez owady. Zakładają wyprostowanie odpowiednich zgięć złożonego żagla w celu rozłożenia całej struktury. W celu rozłożenia modelu na podstawie jego siatki określono, które zgięcia mogą odpowiadać poszczególnym elementom owadzych skrzydeł. To odwzorowanie przedstawia rysunek 4.4 dla mechanizmu wykorzystującego nitinol i rysunek 4.5 dla mechanizmu sterowanego ciśnieniem, które to mechanizmy opisano w kolejnych podrozdziałach.

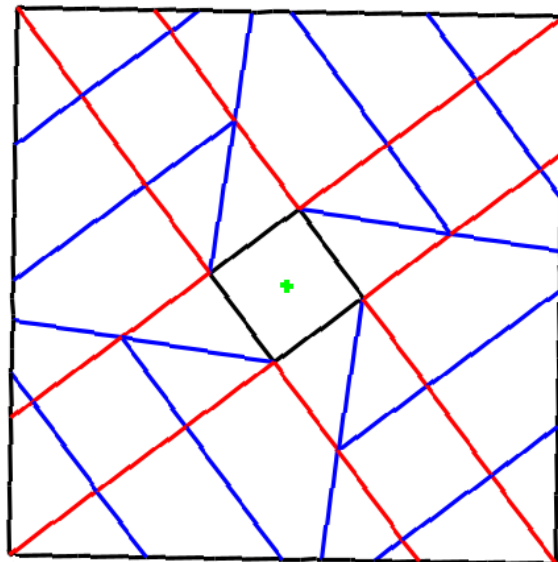
#### 4.2.1 Szkielet z nitinolu sterowany prądem

W celu odwzorowania mechanizmu rozkładającego owadzie skrzydła zaproponowano zastosowanie materiału z „pamięcią kształtu”. Nitinol jest stopem niklu i ty-

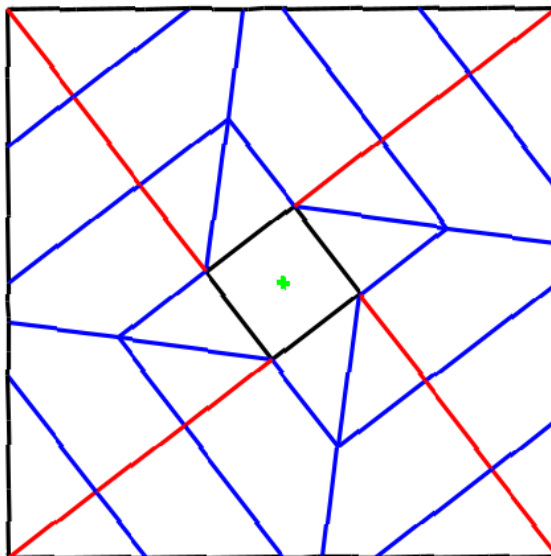




Rysunek 4.3 Skrzydło owada. Czarna linia – linia zgięcia wzdłużnego, czerwona linia – linia zgięcia poprzecznego [Haa06]



Rysunek 4.4 Zgięcia na modelu żągla opartego na nitinolu. Linie czerwone odpowiadają żyłkom, linie niebieskie – liniom zgięcia



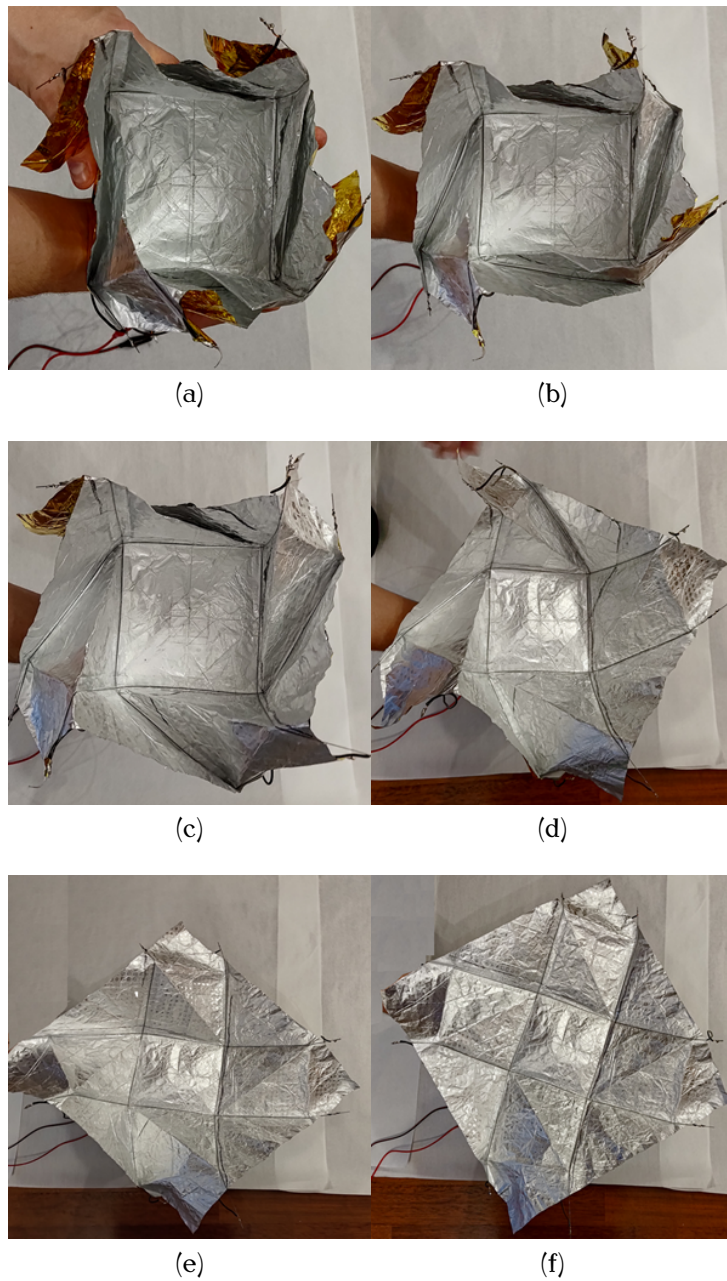
Rysunek 4.5 Zgięcia na modelu żagla sterowanego ciśnieniem. Linie czerwone odpowiadają żyłkom, linie niebieskie – liniom zagięcia

tanu, który posiada tę własność [Wikf]. Oznacza to, że może zostać odkształcony, ale po przepuszczeniu przez niego prądu elektrycznego i ogrzaniu go powróci do kształtu przed odkształceniem [CKS69]. Pod wpływem prądu szkielec z nitinolu mógłby rozłożyć żagiel, a niska temperatura przestrzeni kosmicznej spowodowałaby szybkie ochłodzenie konstrukcji i usztywnienie jej [GFGS02].

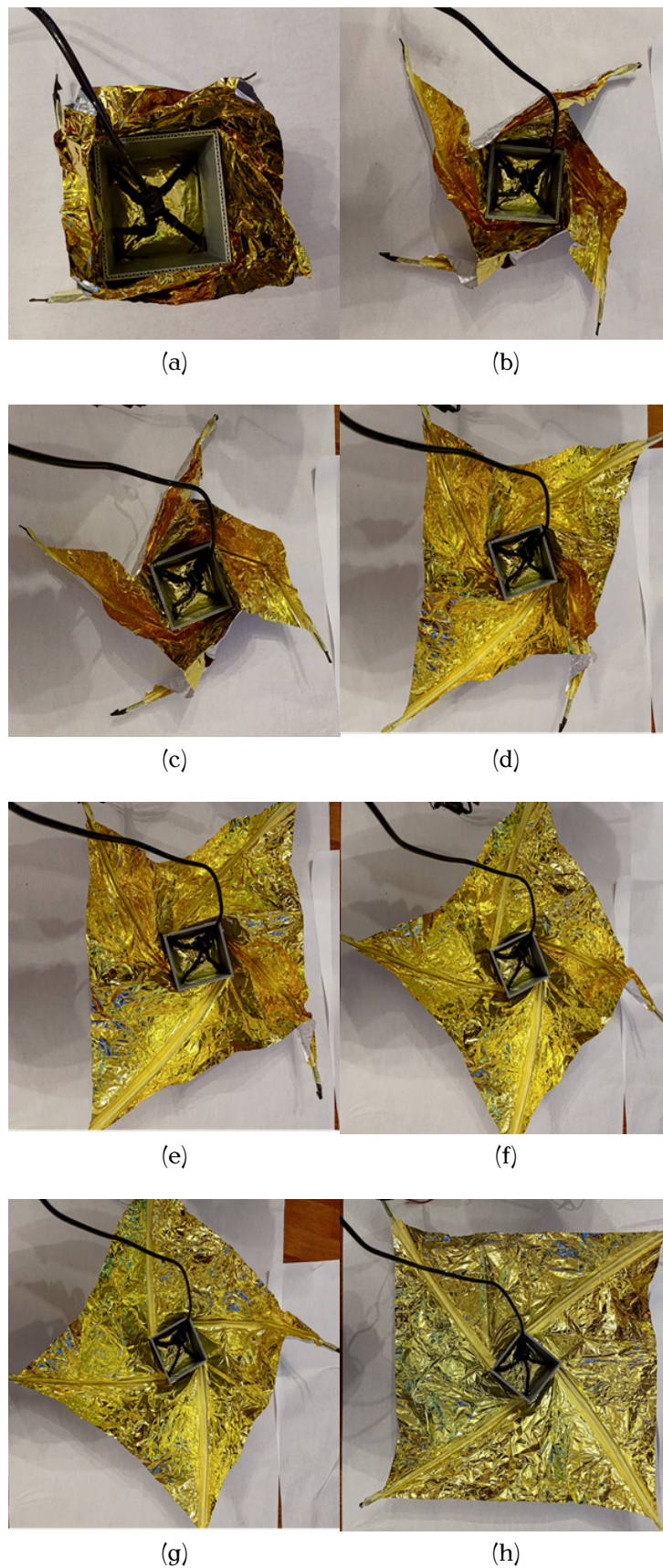
Aby sprawdzić to rozwiązanie, ze wspomnianego wcześniej materiału złożono model żagla przyklejając do odpowiednich zgięć druty wykonane z nitinolu. Następnie przyłożono napięcie do drutów. Pod wpływem temperatury wywołanej przepływem prądu, druty zaczęły się prostować, rozkładając model. Ten proces przedstawiono na rysunku 4.6.

Innym sposobem na naśladowanie metody, jaką owady rozkładają skrzydła, może być zastosowanie elastycznych rurek przyczepionych do żagla, w które możliwe byłoby pompowanie gazu. Pod wpływem ciśnienia mogłyby się naprężyć i prostować, co spowodowałoby powrót żagla do swojej rozłożonej postaci. Takie rozwiązanie pozwalałoby na kontrolowane rozwinięcie żagla poprzez regulację ciśnienia w rurkach.

W celu zweryfikowania tej propozycji złożono model ze wspomnianego wcześniej materiału. Do odpowiednich zgięć przyklejono elastyczne rurki. Następnie podłączono do nich pompę i rozpoczęto włączanie powietrza. Pod jego wpływem rurki zaczęły się naprężyć, rozciągając materiał i rozkładając żagiel. Proces przedstawiono na rysunku 4.7.



Rysunek 4.6 Proces rozkładania żagla z użyciem szkieletu zbudowanego z nitinolu



Rysunek 4.7 Proces rozkładania żagla z użyciem szkieletu sterowanego ciśnieniem

# Rozdział 5

## Zakończenie

Celem pracy była analiza możliwości zastosowania matematycznych podstaw technik origami przy konstrukcji żagli słonecznych dedykowanych do napędu robotów kosmicznych. Opracowano i zasymulowano pięć modeli origami oraz zbudowano dwa mechanizmy rozkładania żagla wykorzystując jeden z opracowanych modeli.

Można stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty. Symulacje opracowanych struktur origami wskazują, że te modele mogą pełnić rolę wyznacznika przy składaniu żagla, ponieważ składają się w płaskie lub przyległe do robota struktury. Na podstawie jednej z wybranych struktur zbudowano dwa prototypy mechanizmu rozkładającego żagiel. Testy rozkładania modeli za pomocą tych mechanizmów przeprowadzone w warunkach domowych pozwalają stwierdzić, że tego typu mechanizmy mogłyby znaleźć zastosowanie w budowie żagli słonecznych.

Możliwy jest dalszy rozwój projektu na przykład poprzez zbadanie wpływu grubości nitinolowych drutów na proces rozkładania się żagla lub budowę mechanizmu składania żagla.



# Literatura

- [ATL10] Nasir Adeli, Theodoros Theodorou, Vaios Lappas, Ground demonstration of a solar sail attitude control actuator. W: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010.
- [Ber23] P Berg, The fundamental concepts of the gravity-assist manoeuvre. *European Journal of Physics*, 44(2):025002, 2023.
- [CKS69] William B Cross, Anthony H Kariotis, Frederick J Stimler, Nitinol characterization study. Raport nr GER-14188, NASA, 1969.
- [Die01] Benjamin L Diedrich, *Attitude control and dynamics of solar sails*. Praca magisterska, University of Washington, 2001.
- [DMA<sup>+</sup>11] Myron A Diftler, JS Mehling, Muhammad E Abdallah, Nicolaus A Radford, Lyndon B Bridgwater, Adam M Sanders, Roger Scott Askew, D Marty Linn, John D Yamokoski, FA Permenter, i in., Robonaut 2-the first humanoid robot in space. W: *2011 IEEE international conference on robotics and automation*, strony 2178–2183. IEEE, 2011.
- [Geo73] RM Georgevic, The solar radiation pressure force and torques model. *Journal of the Astronautical Sciences*, 20:257–274, 1973.
- [GFGS02] Jose Maria Gallardo Fuentes, Paul Gumpel, Joachim Strittmatter, Phase change behavior of nitinol shape memory alloys. *Advanced engineering materials*, 4(7):437–452, 2002.
- [GM19] Shengping Gong, Malcolm Macdonald, Review on solar sail technology. *Astrodynamics*, 3:93–125, 2019.
- [Haa06] Fabian Haas, Evidence from folding and functional lines of wings on inter-ordinal relationships in pterygota. *Arthropod Systematics & Phylogeny*, 64(2):149–158, 2006.
- [Hur21] Steve Hurley. Solar sails. <https://explainingscience.org/2021/01/09/solar-sails/>, 2021.
- [Jus86] Jacques Justin, Résolution par le pliage de l'équation du troisième degré et applications géométriques. *L'Ouvert - Journal de l'APMEP d'Alsace et de l'IREM de Strasbourg*, strony 9–19, 1986.
- [Kep10] Jan Kepler, *Ioannis Kepleri Mathematici Caesarei Dissertatio Cum Nuncio Sidereo nuper ad mortales misso à Galilaeo Galilaeo Mathematico Patavino*. Sedesanus, 1610.

- [Kor85] Miura Koryo, Method of packaging and deployment of large membranes in space. *The Institute of Space and Astronautical Science report*, 618:1–9, 1985.
- [KPN98] Antonia B Kesel, Ute Philippi, Werner Nachtigall, Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method. *Computers in Biology and Medicine*, 28(4):423–437, 1998.
- [Max65] James Clerk Maxwell, *A dynamical theory of the electromagnetic field*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London., 1865.
- [Nor] Northrop Grumman. Pioneering the future of satellite servicing. <https://www.northropgrumman.com/space/mission-robotic-vehicle-mrv-satellite-technology>.
- [Oria] Oriedita. <https://oriedita.github.io/>.
- [Orib] Origami.guide Website. How to make origami mountain & valley folds. <https://origami.guide/beginner-origami/origami-folding-techniques/origami-mountain-valley-folds/>.
- [PIA] PIAP Space Sp. z o. o. Projekt eross iod. <https://piap.space/pl/news/projekt-eross-iod-2/>.
- [Sam20] L. Samosata, *Lucian's True History*. Library of Alexandria. Library of Alexandria, 2020.
- [SBD18] Maria Cristina Vilela Salgado, Mischel Carmen Neyra Belderrain, Tessaleno Campos Devezas, Space propulsion: A survey study about current and future technologies. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 10:e1118, 2018.
- [SG<sup>+</sup>11] Mark Schenk, Simon D Guest, i in., Origami folding: A structural engineering approach. *Origami*, 5:291–304, 2011.
- [Sim] Origami simulator. <https://origamisimulator.org>.
- [SMPS17] Robert Salazar, Sheila Murthy, Chase Pellazar, Adrian Stoica, Transformers for lunar extreme environments: Large origami deployable solar reflectors. *W: 2017 IEEE Aerospace Conference*, strony 1–7, 2017.
- [The] The Planetary Society. Lightsail, a planetary society solar sail spacecraft. <https://www.planetary.org/sci-tech/lightsail>.
- [Tre] Treemaker. <https://langorigami.com/article/treemaker/>.
- [Wika] Wikipedia contributors. Akira Yoshizawa. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Akira\\_Yoshizawa&oldid=1169901830](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Akira_Yoshizawa&oldid=1169901830).
- [Wikb] Wikipedia contributors. Cimon (robot). [https://en.wikipedia.org/wiki/Cimon\\_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cimon_(robot)).
- [Wikc] Wikipedia contributors. Crease pattern. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Crease\\_pattern&oldid=1176038815](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Crease_pattern&oldid=1176038815).
- [Wikd] Wikipedia contributors. IKAROS. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IKAROS&oldid=1154513483>.



- 
- [Wike] Wikipedia contributors. Mathematics of paper folding. [https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematics\\_of\\_paper\\_folding](https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematics_of_paper_folding).
- [Wikf] Wikipedia contributors. Nitinol. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Nitinol>.
- [Wik23] Wikipedia contributors. Solar sail. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar\\_sail&oldid=1188871564](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_sail&oldid=1188871564), 2023.
- [Woo92] Robin J. Wootton, Functional morphology of insect wings. *Annual Review of Entomology*, 37(1):113–140, 1992.



# Spis rysunków

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Żagiel słoneczny...   | 5  |
| 2.1  | Zastosowanie żagla słonecznego – przykład pierwszy...   | 9  |
| 2.2  | Zastosowanie – przykład pierwszy, ścieżka lotu ...  | 9  |
| 2.3  | Zastosowanie żagla słonecznego – przykład drugi...  | 10 |
| 2.4  | Zastosowanie – przykład drugi, ścieżka lotu...  | 10 |
| 2.5  | Zastosowanie żagla słonecznego – przykład trzeci...   | 11 |
| 2.6  | Zastosowanie – przykład trzeci, ścieżka lotu ...  | 11 |
| 2.7  | Odważniki na szynach przymocowanych do żagla ...  | 12 |
| 2.8  | Odważnik zamontowany na wysięgniku ...  | 12 |
| 3.1  | Diagram „krok po kroku” łabędzia ...  | 14 |
| 3.2  | Siatka zgięć, baza i gotowy model łabędzia ...  | 14 |
| 3.3  | Kierunki zgięć ...  | 15 |
| 3.4  | Siedem aksjomatów origami   | 16 |
| 3.5  | Zasada dwóch kolorów [Wike]...  | 17 |
| 3.6  | Zasada Kawasakiego [Wike]...  | 18 |
| 3.7  | Zasada Maekawy-Justina [Wike]...  | 18 |
| 3.8  | Siatki zgięć modeli z grupy A: a) trójkąt b) kwadrat  | 19 |
| 3.9  | Symulacja złożonego modelu „trójkąt” z grupy A  | 20 |
| 3.10 | Symulacja złożonego modelu „kwadrat” z grupy A  | 21 |
| 3.11 | Żagiel oparty o cztery trójkąty wykorzystujące złożenie Miury   | 22 |
| 3.12 | Siatki zgięć modeli z grupy B   | 23 |
| 3.13 | Symulacja złożonego modelu „trójkąt” z grupy B  | 24 |
| 3.14 | Symulacja złożonego modelu „kwadrat” z grupy B  | 25 |
| 3.15 | Symulacja złożonego modelu „sześciokąt” z grupy B   | 26 |
| 4.1  | Zmodyfikowana siatka zgięć modelu kwadratu z grupy B  | 28 |
| 4.2  | Rozkład żyłek w skrzydle ważki [KPN98]  | 28 |
| 4.3  | Skrzydło owada. Czarna linia – linia zgięcia wzdłużnego, czerwona linia – linia zagięcia poprzecznego [Haa06]         | 29 |
| 4.4  | Zgięcia na modelu żagla opartego na nitinolu. Linie czerwone odpowiadają żyłkom, linie niebieskie – liniom zagięcia   | 29 |
| 4.5  | Zgięcia na modelu żagla sterowanego ciśnieniem. Linie czerwone odpowiadają żyłkom, linie niebieskie – liniom zagięcia | 30 |
| 4.6  | Proces rozkładania żagla z użyciem szkieletu zbudowanego z nitinolu   | 31 |
| 4.7  | Proces rozkładania żagla z użyciem szkieletu sterowanego ciśnieniem   | 32 |